doi:10.13866/j.azr.2019.02.26

内蒙古森林雪灾风险评估与区划①

丁延龙[1]，孙晓瑞[1]，高 永[1]，党晓宏[1]，焦宏远[1]，吴 昊[2]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010020；2. 包头市气象局达茂旗气象台，内蒙古 包头 014500）

摘 要：基于自然灾害风险理论，选取森林雪灾相关的气象、林业、基础地理信息和社会经济等数据，从致灾因子危险性、承灾体易损性、孕灾环境敏感性和防灾减灾能力4个方面综合评估内蒙古森林雪灾风险程度的地区差异，利用加权综合评分法、层次分析法建立并计算森林雪灾综合风险评估指标体系及指数，构建出内蒙古森林雪灾风险区划模型。内蒙古森林雪灾高风险区、次高风险区分别占全部森林雪灾风险区的77.18%、0.05%，且均位于内蒙古东北部的呼伦贝尔市。中等风险区占全部森林雪灾风险区的6.01%，主要位于锡林郭勒盟、呼伦贝尔市、赤峰市及兴安盟，分别占中等风险区总面积的0.61%、36.50%、9.11%和5.99%；次低风险区和低风险区占全部森林雪灾风险区的16.76%，主要位于阿拉善盟、鄂尔多斯市、兴安盟等地。内蒙古森林雪灾风险呈现自东北向西南逐渐减轻的趋势，与森林、积雪空间分布规律基本一致。

关键词：森林雪灾；自然灾害风险理论；风险区划；内蒙古

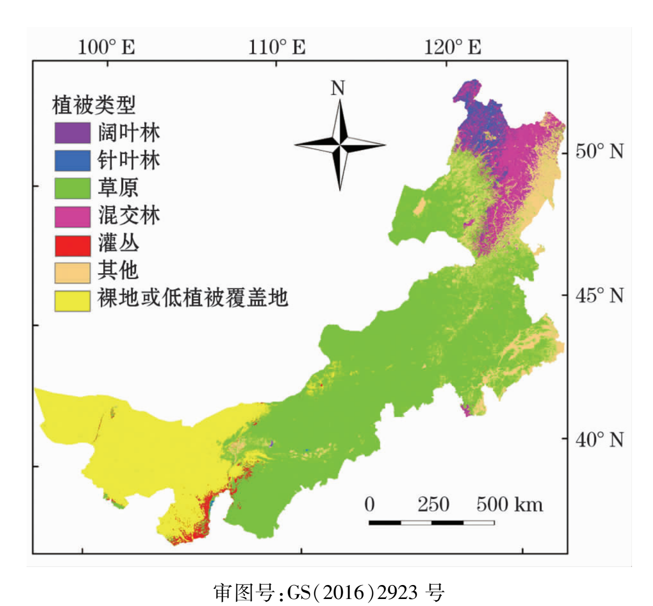
森林作为陆地生态系统的主体[1]，在涵养水源、提供林木资源、净化空气等方面起着重要作用[2]。据第七次全国森林资源清查结果，内蒙古森林面积居全国第一位，林木蓄积量居第五位，森林资源十分丰富[3]。由于内蒙古所处地理位置纬度偏北，每年均有低温冰雪灾害发生[4]，为我国三大积雪分布区之一[5]。长时间的冰雪积压易造成林木弯曲、断梢、断干、倒伏、翻蔸等[6-7]，严重影响了林木的正常生长，并改变森林生态系统的结构组成，降低其功能与效益，并影响森林生态系统的演替方向，危及森林生态系统的稳定性与健康[8]。因此，研究内蒙古森林冰雪灾害的发生等级及分布状况，对灾害的预防至关重要。

国内外学者对森林雪灾的研究开展较早，已积累大量成果[6-10]，但与旱灾、病虫害等其他灾种相比，森林雪灾研究资料仍旧比较匮乏，且多侧重于雪灾对森林造成损失状况及森林灾后修复与重建等[11-13]，自然灾害风险理论模型在综合分析灾害的致灾因子、承灾体、防灾减灾能力、孕灾环境的基础上，建立灾害的综合风险指数，构建灾害风险区划模型[14]。近年来，有学者将自然灾害风险理论模型引入到地质、气象、农业、草原等的灾害评估中[15-20]，在低温冷害、雪灾风险评估方面亦有较多研究，王颖等[21]选取中国气象数据与灾情数据，得到中国低温雨雪冰冻灾害风险区划图。陈彦清等[22]通过分析气象、地形、社会经济、畜牧等雪灾的因子，利用层次分析法，通过GIS平台，绘制了中国雪灾风险评价分级图。与传统的灾害指标及发生频率统计分析相比，上述研究构建的灾害综合风险指数及评估模型集成了灾害发生相关的诸多因素，体现灾害各影响因子的综合作用，其科学性更强。内蒙古东西跨度2 400 km，各地区气候、土壤等自然条件差异较大，社会经济发展水平高低不同，面临灾害的抵御能力有所差异，因此受灾程度不仅与雪灾致灾因子有关，承灾体、孕灾环境及防灾减灾能力也是重要的影响因素[23]。内蒙古作为我国森林资源大省，森林冰雪灾害频繁发生，但有关内蒙古地区森林雪灾风险评估与区划的研究却较为缺乏，采用自然风险理论对内蒙古森林雪灾风险的区划研究更少[24-25]。因此，本文以内蒙古为例，基于自然灾害风险形成原理来评估内蒙古森林雪灾风险程度的区域差异，并建立综合的灾害风险指数，结合GIS技术对内蒙古森林雪灾进行风险区划，并根据历史灾情数据验证评估区划结果，以期为内蒙古政府及防灾救灾部门制定灾前减灾规划和灾后救助决策提供理论支持，进而促进该地区的森林灾害风险管理工作。

① **收稿日期：**2018-07-09； **修订日期：**2018-12-07
基金项目：国家自然科学基金项目(41861044)；国家重点研发计划(2016YFC0501003)
作者简介：丁延龙，(1990-)，男，博士研究生，主要从事林业灾害评估、水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: dingyanlong1990@126.com
通讯作者：高永. E-mail: 13948815709@163.com

1 研究区概况

内蒙古地处中国北部边疆,位于37°24′~53°23′N,97°12′~126°04′E之间,东西长2 400 km,南北宽1 700 km,全区总面积1.18×10^6 km^2,占全国总面积的12.3%,是中国第3大省区。内蒙古森林面积2.49×10^7 hm^2,活立木总蓄积量1.48×10^9 m^3,森林覆盖率21.0%[3]。气候以温带大陆性季风气候为主,年平均气温-3~9 ℃,气温由西南向东北递减;年降水量58~407 mm,由西南向东北递增[26],2001—2016年多年最大积雪深度在0~62.85 cm。积雪深度较高的地区位于内蒙古东部、北部,东北端的呼伦贝尔市积雪覆盖率常年保持在95%以上,为内蒙古积雪覆盖最稳定的区域。内蒙古中西部地区积雪深度相对较低,西南部的阿拉善盟积雪覆盖率常年保持在20%以下[27-28]。平均海拔1 000 m左右。森林主要分布于大兴安岭、燕山北部、阴山山脉及贺兰山,其他山区也有少量分布。森林植被类型主要有温带落叶阔叶林、寒温带和温带山地针叶林和温带针叶林[3,29](图1)。



审图号:GS(2016)2923号

图1 内蒙古地区植被分布

Fig. 1 Distribution of vegetation in Inner Mongolia

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 森林雪灾综合风险评估模型指标选取 影响森林雪灾的因素多种多样,在前期整理大量研究资料的基础上,将其归纳为气象因子、林分因子和地形因子、社会因子4个方面,分别对应风险评估模型中的致灾因子、承载体、孕灾环境及防灾减灾能力,结合内蒙古地区的森林分布、自然条件、气象因素和社会经济情况,在保证可以合理反映森林雪灾风险程度和数据的可获取基础上,确定内蒙古森林雪灾风险评估的指标[27-28](表1)。

依据自然灾害风险形成理论,灾害风险是危险性、易损性、敏感性及防灾减灾能力综合作用的结果,其表达式为:

$$D=f(H,S,V,R) \quad (1)$$

式中:D为灾害风险;H为致灾因子危险性;S为孕灾环境敏感性;V为承灾体易损性;R为抗灾能力。

2.1.2 指标归一化 低温冷冻灾害的上述4个因子又各包含若干个指标,考虑到各指标间的量纲和数量级都是不同的,不能放在同一个标准上进行计算。为了消除这种差异,使各指标间具有可比性,需对每个指标进行规范化处理,规范化出来后的指标值均位于0.5~1.0。其中对于致灾因子危险性、承灾体脆弱性和孕灾环境敏感性所包含的各个指标归一化公式为:

$$X_{ij}=0.5+0.5\times[(x_{ij}-\min_i)/(\max_i-\min_i)] \quad (2)$$

由于防灾减灾能力越强,相对应的灾害风险越小,所以防灾减灾所包括的各个指标的归一化计算公式为:

$$X_{ij}=1.0-0.5\times[(x_{ij}-\min_i)/(\max_i-\min_i)] \quad (3)$$

式中:X_{ij}是j站点第i个指标的归一化值;x_{ij}是j站点第i个指标值;$\min_i$和$\max_i$分别是第i个指标值中的最小值和最大值。这种方法进行归一化处理之后的量化值介于0.5~1之间,消除了各个指标之间量纲的影响,具有了可比性。

2.1.3 加权综合评价法 加权综合评价法是综合考虑每个指标对总体因子的影响程度,是目前最常用的评估方法之一。综合考虑每个指标对综合评价因子的影响程度,把每个具体指标作用的大小综合起来,用一个数量化指标加以集中。计算公式为:

$$V_j=\sum_{i=1}^{n}W_iD_{ij} \quad (4)$$

式中:V_j是评价因子的值,j是评价因子个数,D_{ij}是对于因子j的指标i的归一化值;n是评价指标个数;W_i是指标i的权重,它是综合考虑各指标对评价因子的影响程度,其确定方法较多,本文通过层次分析法确定。

2.1.4 森林雪灾综合风险评估模型的构建 根据自然灾害风险数学公式,结合内蒙古森林雪灾评估

指标体系，利用加权综合评价法，建立如下森林雪灾风险指数模型：

$$FDRI = V_H W_H + V_S W_S + V_V W_V + V_R W_R \quad (5)$$

式中：*FDRI* 为森林雪灾风险指数，表示森林雪灾风险程度，其值越大，则灾害风险程度越大；V_H、V_S、V_V、V_R 分别表示致灾因子、孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力各因子指数；W_H、W_S、W_V、W_R 表示各个评价因子权重。各因子的权重根据专家打分法确定，于2016年8—10月发放调查问卷100份，收回问卷93份，其中有效问卷79份，对其进行总结分析后，通过层次分析法运算得出各个指标及其权重，W_H、W_S、W_V、W_R 分别为0.512 5、0.356 5、0.085 0和0.045 9（表1）。

表1 内蒙古森林雪灾风险评估指标权重

Tab.1 Assessment index weights of forest snow disaster risk in Inner Mongolia

目标层	准则层	方案层	权重
内蒙古森林雪灾风险评估	致灾因子(0.512 5)	气温	0.051 5
		风速	0.180 5
		积雪深度	0.451 3
		积雪面积	0.316 7
	承灾体(0.356 5)	胸径	0.168 8
		郁闭度	0.168 8
		混交林	0.127 5
		针叶林	0.300 9
		阔叶林	0.190 7
		灌丛	0.043 4
	孕灾环境(0.085 0)	海拔	0.559 1
		坡度	0.352 2
		坡向	0.088 7
	防灾减灾能力(0.045 9)	人均GDP	0.166 7
		林业资金投入	0.833 3

通过加权综合评价法，分别计算致灾因子、承灾体、孕灾环境和防灾减灾能力4个方面的风险指数值，具体表达式为：

$$V_H = 0.051\,5x_1 + 0.180\,5x_2 + 0.451\,3x_3 + 0.316\,7x_4 \quad (6)$$

$$V_S = 0.168\,8x_5 + 0.168\,8x_6 + 0.127\,5x_7 + 0.300\,9x_8 + 0.170\,9x_9 + 0.043\,4x_{10} \quad (7)$$

$$V_V = 0.559\,1x_{11} + 0.352\,2x_{12} + 0.088\,7x_{13} \quad (8)$$

$$V_R = 0.166\,7x_{14} + 0.833\,3x_{15} \quad (9)$$

式中，V_S、V_H、V_V、V_R 分别指致灾因子、承灾体、孕灾环境和防灾减灾能力的值，X_{1-15}分别是气温、风速、积雪深度、积雪面积、平均胸径、郁闭度、混交林占比、针叶林占比、阔叶林占比、灌丛占比、海拔、坡度、坡向、人均GDP和林业资金投入。

最后，利用Kriging插值法将各项风险指数插值到内蒙古的1 km×1 km网格上，以自然断点分级法将致灾因子危险性指数划分为5个等级，得到内蒙古森林雪灾致灾因子危险性区划结果。

2.2 数据来源

气温和降水量数据采用2001—2016年内蒙古50个气象站观测数据；积雪面积提取自美国国家雪冰数据中心的MODIS/Terra 8日合成积雪数据（MOD10A2，简称MOD）；积雪深度利用2001—2016年逐日中国雪深长时间序列数据集，其中不同年份数据分别来自SSM/I（2001—2007年）和SSMI/S（2008—2016年）逐日被动微波亮温数据（EASE-Grid）；平均胸径和郁闭度来自内蒙古自治区林业监测规划院；混交林、针叶林、阔叶林、灌丛数据来源于搭载Terra和Aqua卫星上的MCD12Q1产品数据；人均GDP和林业资金投入来自内蒙古统计年鉴；利用DEM数据衍生出坡度和坡向。

3 内蒙古森林雪灾风险区划

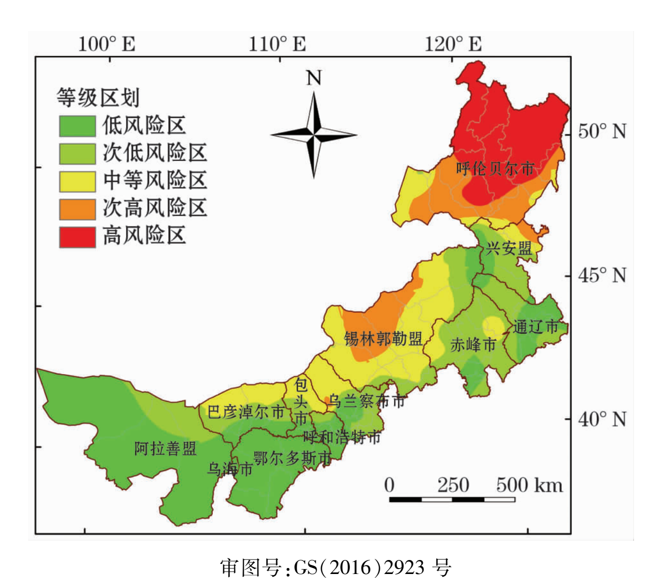
3.1 致灾因子危险性区划

致灾因子主要反映引起森林雪灾本身的致灾因子强度、概率和影响范围等，是雪灾发生的先决条件。致灾因子强度越大，概率越高，影响范围越广，则雪灾所造成的破坏损失就越严重，越容易遭受雪灾的威胁，灾害风险也就越大[30]。

内蒙古森林雪灾致灾因子危险性空间分布呈现由东北部到中部逐渐降低，到西南部危险性增加的趋势（图2）。雪灾高危险区主要位于东北部，即额尔古纳市、根河市、鄂伦春自治旗、牙克石市以及鄂温克自治旗、陈巴尔虎旗、呼伦贝尔市、阿荣旗、莫力达瓦自治旗的局部。次高危险区分布于高危险区周边，即局部的陈巴尔虎旗、呼伦贝尔市、鄂温克自治旗、新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗、阿荣旗、扎兰屯市和莫力达瓦自治旗，兴安盟的扎赉特旗，锡林郭勒盟的阿巴嘎旗、苏尼特左旗和苏尼特右旗。

3.2 承灾体易损性区划

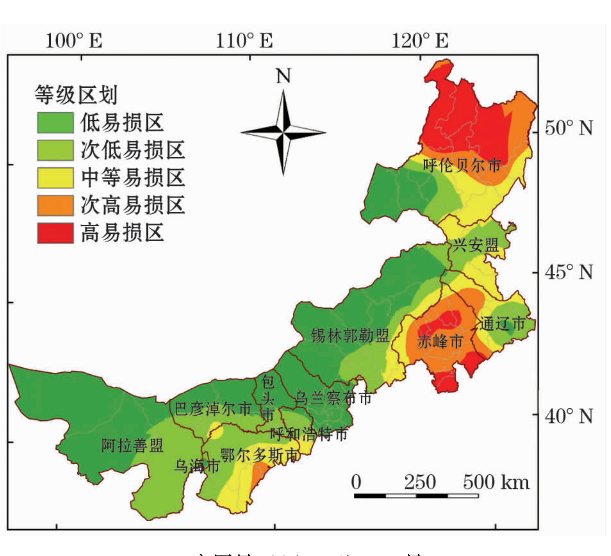
易损性表示承灾体面临雪害威胁时产生损失的可能性大小，笔者将胸径、郁闭度和树种组成纳入到易损性指标体系。一般而言，易损性越高，灾损越严重，反之，灾损越轻。在GIS平台基于承灾体易损性



审图号:GS(2016)2923 号

图 2　内蒙古森林雪灾危险性区划图

Fig. 2　Zoning map of forest snow disaster risk in Inner Mongolia



审图号:GS(2016)2923 号

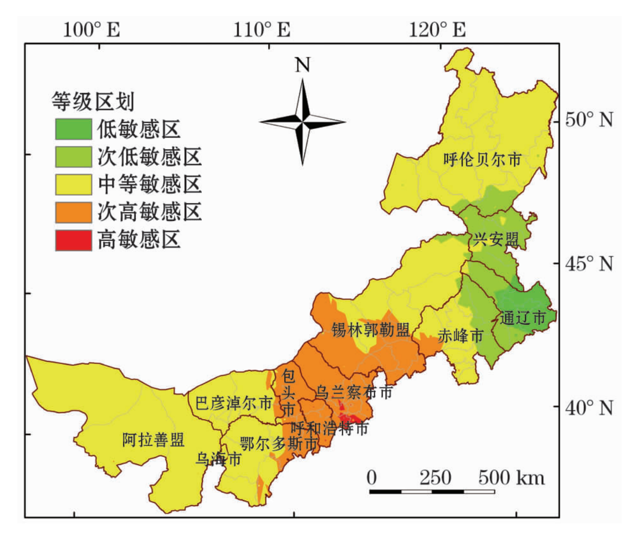
图 3　内蒙古森林雪灾易损性区划图

Fig. 3　Zoning map of vulnerability of forest snow disasters in Inner Mongolia

指数,绘制出内蒙古森林雪灾承灾体易损性区划(图 3)。结果显示,高易损区主要分布在呼伦贝尔市的额尔古纳、根河、鄂伦春自治旗与赤峰市的宁城、林西、敖汉旗、喀喇沁旗、巴林左旗和呼伦贝尔市陈巴尔虎旗的北部。次高易损区主要位于赤峰市大部和呼伦贝尔市东部和中部,涉及额尔古纳市、牙克石市、陈巴尔虎旗、鄂伦春自治旗、莫力达瓦自治旗和阿荣旗。

3.3　孕灾环境敏感性区划

在气候条件相同情况下,孕灾环境的地形地貌条件与积雪相结合,很有可能加剧森林雪灾致灾因子以及次生灾害的发生。有研究显示,山地、丘陵地区温度的空间分布的影响因素很多,包括地理经纬度、大水体的距离以及山脉河流的走向等宏观地理条件,而海拔、坡度、坡向、地形遮蔽等小地形因子的影响更为显著[31]。综合考虑内蒙古实际地形地貌情况,选取海拔、坡度和坡向作为孕灾环境敏感性指标,得到内蒙古森林雪灾孕灾环境敏感性区划(图 4)。结果显示高敏感区位于乌兰察布市南部的凉城县、卓资县及丰镇市。次高敏感区位于内蒙古中段,包括呼和浩特市、乌兰察布市、包头市大部及锡林郭勒盟南部、鄂尔多斯市、赤峰市和巴彦淖尔市的局部地区。中等敏感区位于内蒙古东北部的呼伦贝尔市、西部的阿拉善盟、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市和锡林郭勒盟东、北部,赤峰市的西、南部也有所涉及。低敏感区位于通辽市、兴安盟大部及赤峰市的东、南部。高敏感区海拔较高,中等敏感区海拔次之,低敏感区处于全区最低。说明高海拔区容易遭受雪灾危害,而低海拔地区相反。



审图号:GS(2016)2923 号

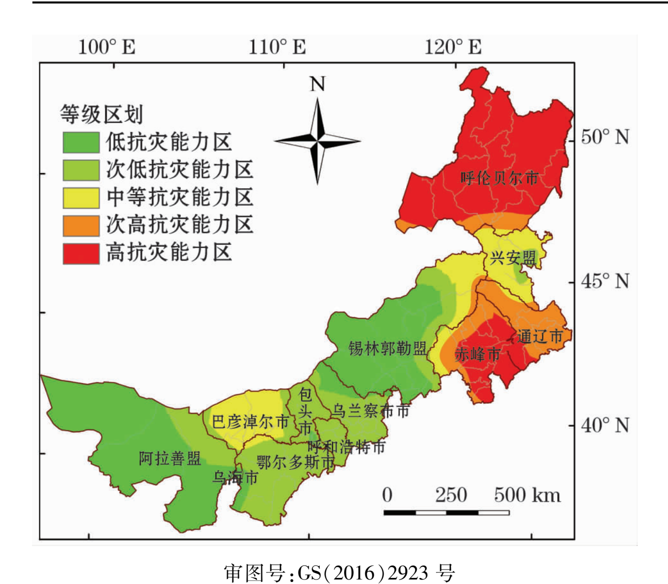
图 4　内蒙古森林雪灾敏感性区划图

Fig. 4　Zoning map of sensitivity of forest snow disasters in Inner Mongolia

3.4　防灾减灾能力区划

防灾减灾能力指受灾地区抵御冰雪灾害以及灾后恢复能力的强弱[14]。本文以人均 GDP、单位林地林业资金投入来表征该地区的经济发展水平和抗灾能力(图 5)。人均 GDP 越大,林业资金投入越多,表明该地区经济发展水平越高,抗灾能力越强;反之抗灾能力越弱。

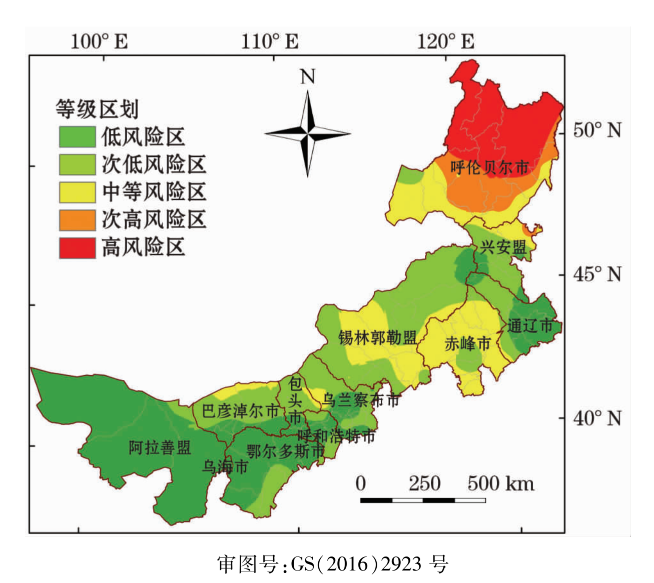
根据内蒙古森林雪灾防灾减灾能力区划图,高



审图号:GS(2016)2923 号

图 5 内蒙古森林雪灾防灾减灾能力区划图

Fig. 5 Zoning map of capability of forest snow disaster prevention and reduction in Inner Mongolia



审图号:GS(2016)2923 号

图 6 内蒙古森林雪灾风险区划图

Fig. 6 Zoning map of forest snow disaster risk in Inner Mongolia

抗灾能力地区主要包括呼伦贝尔市和赤峰市,这一区域也是内蒙古森林主要分布地区,林业资金投入较高,因此其抗灾能力较强。中等抗灾能力地区为巴彦淖尔市和兴安盟地区。低抗灾能力分布区主要位于阿拉善盟、锡林郭勒盟和兴安盟的局部,以上地区主要由裸地、低植被覆盖和草原组成,林业资金投入相对高抗灾能力地区少,所以该地区抗灾能力最弱。

3.5 综合风险区划

森林雪灾风险评估与区划是结合致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性和防灾减灾能力 4 个因子综合作用的结果。利用公式计算出内蒙古 *FDRI* 值,作为综合评估和区划低温冷害、降雪等因素对森林的风险程度指数,通过 GIS 技术绘制出内蒙古森林雪灾风险区划图。

由图 6 可知,内蒙古森林雪灾高风险区主要位于内蒙古东北部,即额尔古纳市、根河市、鄂伦春自治旗以及牙克石市、陈巴尔虎旗、阿荣旗、莫力达瓦自治旗局部地区;次高风险区主要包括牙克石市以及陈巴尔虎旗、新巴尔虎左旗、鄂温克自治旗、阿荣旗、莫力达瓦自治旗、呼伦贝尔市局部;中等风险区主要位于阿拉善盟、赤峰市、呼伦贝尔市,以及锡林郭勒盟、兴安盟和乌兰察布市部分地区;次低风险区和低风险区位于呼伦贝尔的满洲里市和新巴尔虎右旗,巴彦淖尔市、包头市、乌海市、鄂尔多斯市、乌兰察布市、通辽市、兴安盟、锡林郭勒盟以及赤峰市部分地区。

以盟市行政单元统计的内蒙古森林雪灾风险分区的统计数据(表 2),统计区域仅限于森林分布地区。可知内蒙古森林雪灾高风险区占全部森林雪灾风险区的 77.18%,且均位于内蒙古东北部的呼伦贝尔市,包括额尔古纳市、根河市、鄂伦春自治旗以及牙克石市、陈巴尔虎旗、阿荣旗、莫力达瓦自治旗局部地区,次高风险区占内蒙古全部森林雪灾风险区的 0.05%,全部在呼伦贝尔市,高风险区、次高风险区面积合计占呼伦贝尔市所有等级风险区的 94.70%。中等风险区占全部森林雪灾风险区的 6.01%,主要位于锡林郭勒盟、呼伦贝尔市、赤峰市及兴安盟,4 地中等风险区面积分别占中等风险区总面积的 0.61%、36.50%、9.11% 及 5.99%;次低风险区和低风险区占全部森林雪灾风险区的16.76%,主要位于阿拉善盟、鄂尔多斯市、兴安盟等地。

4 讨论与结论

4.1 讨论

王颖等[21]对中国低温冷害区划的研究认为,内蒙古东北部为高危险区,西部的阿拉善地区局部为中风险区,中部为低风险区和次低风险区。陈彦清等[22]对中国雪灾风险评估进行区划,认为内蒙古东北部为高风险区,中部为次高风险区,西部为中风险区。本文的内蒙古森林雪灾风险评估与区划结果与上述研究结果大体一致。内蒙古东北部是中国最寒冷地区之一,也是积雪期最长和积雪深度最厚的地区,该区 1 月平均最低气温低于 -30 ℃,绝对最低

表 2　内蒙古森林雪灾风险等级分区

Tab. 2　Proportions of forest snow disaster risk in the subregions in Inner Mongolia　/%

	低风险区		次低风险区		中等风险区		次高风险区		高风险区	
	占该类型区比例	占该盟市比例	占该类型区比例	占该盟市比例	占该类型区比例	占该盟市比例	占该类型区比例	占该盟市比例	占该类型区比例	占该盟市比例
呼伦贝尔市	0	0	2.17	0.15	36.50	5.21	100.00	0.06	100.00	94.64
兴安盟	3.24	6.57	31.03	67.16	5.99	26.26	0	0	0	0
通辽市	2.86	69.12	1.20	30.88	0	0	0	0	0	0
赤峰市	0.07	0.25	6.19	25.03	9.11	74.72	0	0	0	0
锡林郭勒盟	0.12	10.62	0.79	53.40	0.61	35.99	0	0	0	0
乌兰察布市	0.19	4.00	4.32	96.00	0	0	0	0	0	0
呼和浩特市	0.37	100.00	0	0	0	0	0	0	0	0
包头市	2.16	50.18	2.01	49.82	0	0	0	0	0	0
鄂尔多斯市	59.13	98.40	0.90	1.60	0	0	0	0	0	0
巴彦淖尔市	12.86	62.26	7.30	37.74	0	0	0	0	0	0
乌海市	8.35	100.00	0	0	0	0	0	0	0	0
阿拉善盟	58.45	70.90	44.11	29.10	0	0	0	0	0	0
全区	11.01	5.75	6.01	0.05	77.18					

气温在 -40 ℃以下,比全球同纬度地区的气温低 15~25 ℃[32]。由于气温低,降雪日数多,积雪持续时间久,使得该区致灾因子指数高。一般而言,林木郁闭度越大,受低温、雨雪、冰冻影响越大[6-13]。内蒙古东北端大兴安岭北部多为原始针叶林覆盖,郁闭度很高,唐初明等[33]研究认为纯林层次结构较为简单,遇到持续的冰雪灾害时不能够承受积雪的重量,发生雪灾的可能性较高。而混交林相对于纯林层次结构错综复杂,在一定的条件下能够对冰雪起到层层过滤阻截的作用,降低冰雪重量对树木冠层的积压作用力,使得混交林整体上形成抗雪压冰冻体系,抗灾能力较强[34]。次高易损区虽与高易损区同样位于内蒙古东北部,二者气候、地理背景相似,但由于次高易损区多为混交林分布,其受损可能性亦相应降低。

据内蒙古自治区人民政府公告[35],内蒙古 103 个旗县区级行政单位,以及内蒙古森工集团所管辖区域森林,全部开展了森林保险工作,实现了全区森林保险全覆盖。据承保单位(中华联合财产保险公司内蒙古分公司与人保财险内蒙古分公司)森林历史冰雪灾情统计资料,内蒙古 2013—2015 年共发生森林雪灾 20 起,主要分布于东北部的呼伦贝尔市,属于雪灾风险区划中的高风险区,由此说明内蒙古森林雪灾风险评估和区划结果与内蒙古实际森林雪灾发生情况基本吻合。

4.2　结论

通过对内蒙古森林雪灾致灾因子、承载体、孕灾环境及防灾减灾能力的区划,构建了内蒙古森林雪灾风险评估模型与区划,结合内蒙古历史灾情验证,该区划结果与实际情况较为吻合,由内蒙古森林灾害综合风险区划结果可得出以下结论:

内蒙古森林雪灾高风险区、次高风险区分别占全部森林雪灾风险区的 77.18%、0.05%,且均位于内蒙古东北部的呼伦贝尔市,二者面积合计占呼伦贝尔市所有等级风险区的 94.70%。中等风险区占全部森林雪灾风险区的 6.01%,主要位于锡林郭勒盟、呼伦贝尔市、赤峰市及兴安盟,4 地中等风险区面积分别占中等风险区总面积的 0.61%、36.50%、9.11% 及 5.99%;次低风险区和低风险区占全部森林雪灾风险区的 16.76%,主要位于阿拉善盟、鄂尔多斯市、兴安盟等地。内蒙古森林雪灾风险呈现自东北向西南逐渐减轻的趋势,与森林、积雪空间分布规律基本一致。

参考文献(References):

〔1〕 吴丹,邵全琴,刘纪远. 江西泰和县森林生态系统水源涵养功能评估〔J〕. 地理科学进展,2012,31(3):330-336.〔Wu Dan, Shao Quanqin, Liu Jiyuan. Assessment of water conservation function of forest ecosystem in Taihe County, Jiangxi Province〔J〕. Progress in Geography,2012,31(3):330-336.〕

〔2〕 王旭. 冰雪灾害对南岭常绿阔叶林结构的影响研究〔D〕. 北京:中国林业科学研究院,2012.〔Wang Xu. Effect of Ice Storm on the Structure of Evergreen Broad-Leaved Forest in Nanling Mountains〔D〕. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2012.〕

〔3〕 黄晓琼,辛存林,胡中民,等. 内蒙古森林生态系统碳储量及其空间分布〔J〕. 植物生态学报,2016,40(4):327-340.〔Huang Xiaoqiong, Xin Cunlin, Hu Zhongmin, et al. Carbon storage of the forests and its spatial pattern in Nei Mongol, China〔J〕. Chinese

Journal of Plant Ecology,2016,40(4):327－340.]

〔4〕 杨丽桃,顾润源,邸瑞琦. 内蒙古地区2009/2010年冬季低温雪灾影响评估[J]. 中国农业气象,2011,32(增刊1):199－202.[Yang Litao,Gu Runyuan,Di Ruiqi,et al. Effect evaluation of low temperature and snow disaster in winter 2009/2010 in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2011,32(Suppl.1):199－202.]

〔5〕 孙晓瑞,高永,丁延龙,等. 基于MODIS数据的2001—2016年内蒙古积雪分布及其变化趋势[J]. 干旱区研究,2019,36(1):1－14.[Sun Xiaorui,Gao Yong,Ding Yanlong,et al. Distribution and trend of snow cover in Inner Mongolia from 2001 to 2016 based on MODIS data[J]. Arid Zone Research,2019,36(1):1－14.]

〔6〕 吴可可,彭少麟,陈蕾伊,等. 南方森林雨雪冰冻灾害的特征[J]. 生态学杂志,2011,30(3):611－620.[Wu Keke,Peng Shaolin,Chen Leiyi,et al. Characteristics of forest damage induced by frozen rain and snow in South China[J]. Chinese Journal of Ecology,2011,30(3):611－620.]

〔7〕 赵霞,沈孝清,黄世能,等. 冰雪灾害对杨东山十二度水自然保护区木本植物机械损伤的初步调查[J]. 林业科学,2008,44(11):164－167.[Zhao Xia,Shen Xiaoqing,Huang Shineng,et al. Mechanical damages to woody plants from a snow disaster in Yangdongshan Shierdushui Provincial Nature Reserve[J]. Scientia Silvae Sinicae,2008,44(11):164－167.]

〔8〕 薛建辉,胡海波. 冰雪灾害对森林生态系统的影响与减灾对策[J]. 林业科学,2008,44(4):1－2.[Xue Jianhui,Hu Haibo. Impact of ice and snow disaster on forest ecosystem and countermeasures for disaster reduction[J]. Scientia Silvae Sinicae,2008,44(4):1－2.]

〔9〕 Mckay G A,Thompson H A. Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data[J]. Journal of Applied Meterology,1969,8(6):927－935.

〔10〕 Petty J A,Worrell R. Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow[J]. Forestry,1981,54(2):115－128.

〔11〕 苏志尧,刘刚,区余端,等. 车八岭山地常绿阔叶林冰灾后林木受损的生态学评估[J]. 植物生态学报,2010,34(2):213－222.[Su Zhiyao,Liu Gang,Ou Yuduan,et al. Storm damage in a montane evergreen broadleaved forest of Chebaling National Nature Reserve,South China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(2):213－222.]

〔12〕 许业洲,孙晓梅,宋丛文,等. 鄂西亚高山日本落叶松人工林雪灾调查[J]. 林业科学,2008,44(11):11－17.[Xu Yezhou,Sun Xiaomei,Song Congwen,et al. Damage of sub-alpine *Larix kaempferi* plantation induced by snow storm in western Hubei[J]. Scientia Silvae Sinicae,2008,44(11):11－17.]

〔13〕 何茜,李吉跃,陈晓阳,等. 2008年初特大冰雪灾害对粤北地区杉木人工林树木损害的类型及程度[J]. 植物生态学报,2010,34(2):195－203.[He Qian,Li Jiyue,Chen Xiaoyang,et al. Types and extent of damage to *Cunninghamia lanceolata* plantations due to unusually heavy snow and ice in Southern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(2):195－203.]

〔14〕 王春乙,王石立,霍治国,等. 近10年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展[J]. 气象学报,2005,63(5):659－671.[Wang Chunyi,Wang Shili,Huo Zhiguo,et al. Progress in research of agro-meteorological disasters in China in recent decade[J]. Acta Meteorologica Sinica,2005,63(5):659－671.]

〔15〕 倪晓娇,南颖. 基于GIS的长白山地区地质灾害风险综合评估[J]. 自然灾害学报,2014,23(1):112－120.[Ni Xiaojiao,Nan Ying. Comprehensive assessment of geological disasters risk in Changbai Mountain region based on GIS[J]. Journal of Natural Disasters,2014,23(1):112－120.]

〔16〕 段云峰,胡正华,刘明春,等. 基于GIS的祁连山东端冰雹灾害风险评估与区划[J]. 长江科学院院报,2016,33(5):129－134.[Duan Yunfeng,Hu Zhenghua,Liu Mingchun,et al. Risk assessment and zonation of hail disaster in the east of Qilian Mountains based on GIS[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2016,33(5):129－134.]

〔17〕 韩炳宏,吴让,周秉荣,等. 基于格网的青海省雪灾综合风险评估[J]. 干旱区研究,2017,34(5):1 035－1 041.[Han Binghong,Wu Rang,Zhou Bingrong,et al. Grid-based estimation of snow disaster risk in Qinghai Province[J]. Arid Zone Research,2017,34(5):1 035－1 041.]

〔18〕 赵霜,方一平. 青海省果洛州草地畜牧业雪灾的恢复力[J]. 干旱区研究,2017,34(4):898－905.[Zhao Shuang,Fang Yiping. Resilience of grassland livestock husbandry against snow disaster in Guoluo Prefecture,Qinghai Province[J]. Arid Zone Research,2017,34(4):898－905.]

〔19〕 贺芳芳,邵步粉. 上海地区低温、雨雪、冰冻灾害的风险区划[J]. 气象科学,2011,31(1):33－39.[He Fangfang,Shao Bufen. Risk regionalization of meteorological disasters caused by cryogenic freezing rain and snow in Shanghai[J]. Journal of the Meteorological Sciences,2011,31(1):33－39.]

〔20〕 唐为安,田红,杨元建,等. 基于GIS的低温冷冻灾害风险区划研究——以安徽省为例[J]. 地理科学,2012,32(3):356－361.[Tang Weian,Tian Hong,Yang Yuanjian,et al. Risk zonation of cold disaster based on GIS:A case study of Anhui province[J]. Scientia Geographica Sinica,2012,32(3):356－361.]

〔21〕 王颖,王晓云,江志红,等. 中国低温雨雪冰冻灾害危险性评估与区划[J]. 气象,2013,39(5):585－591.[Wang Ying,Wang Xiaoyun,Jiang Zhihong,et al. Assessment and zoning of low-temperature,rain/snow and freezing disasters in China[J]. Acta Meteorologica Sinica,2013,39(5):585－591.]

〔22〕 陈彦清,杨建宇,苏伟,等. 县级尺度下雪灾风险评价方法[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊2):307－311.[Chen Yanqing,Yang Jianyu,Su Wei,et al. Risk assessment of snow disaster on county scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(Suppl.2):307－311.]

〔23〕 庄晓翠,周鸿奎,王磊,等. 新疆北部牧区雪灾评估指标及其成因分析[J]. 干旱区研究,2015,32(5):1 000－1 006.[Zhuang Xiaocui,Zhou Hongkui,Wang Lei,et al. Evaluation and cause study on the snow disasters in pastoral areas of Northern Xinjiang[J]. Arid Zone Research,2015,32(5):1 000－1 006.]

〔24〕 侍昊,王笑,薛建辉,等. 基于MODIS/NDVI时间序列的森林灾害快速评估方法——以贵州省为例[J]. 生态学报,2012,32(11):3 359－3 367.[Shi Hao,Wang Xiao,Xue Jianhui,et al. A rapid assessment method for forest disaster based on MODIS/NDVI time series:A case study from Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(11):3 359－3 367.]

〔25〕 吴健生,陈莎,彭建. 基于图像阈值法的森林雪灾损失遥感估测——以云南省为例[J]. 地理科学进展,2013,32(6):913－923.[Wu Jiansheng,Chen Sha,Peng Jian. Assessment of forest

damage due to ice storm using image thresholding techniques: A case study of Yunnan Province〔J〕. Progress in Geography,2013,32(6):913 – 923. 〕

〔26〕 包刚,吴琼,阿拉腾图雅,等. 近 30 年内蒙古气温和降水量变化分析〔J〕. 内蒙古师范大学学报(自然科学版),2012,41(6):668 – 674.〔Bao Gang,Wu Qiong,Alateng Tuya,et al. Changes in temperature and precipitation during past 30 years in Inner Mongolia〔J〕. Journal of Inner Mongolia Normal University(Natural Science Edition),2012,41(6):668 – 674. 〕

〔27〕 孙晓瑞,高永,丁延龙,等. 内蒙古积雪时空分布特征及其与气候因子的相关性〔J〕. 内蒙古林业科技,2017,43(2):10 – 15.〔Sun Xiaorui,Gao Yong,Ding Yanlong,et al. Temporal and spatial distribution of snow cover and its correlation with climatic factors in Inner Mongolia〔J〕. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology,2017,43(2):10 – 15. 〕

〔28〕 孙晓瑞,高永,杨光,等. 森林冰雪灾害致损因子研究综述〔J〕. 浙江林业科技,2017,37(3):79 – 84.〔Sun Xiaorui,Gao Yong,Yang Guang,et al. Review on factors affecting snow and ice damage of forest〔J〕. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology,2017,37(3):79 – 84. 〕

〔29〕 杨浩,胡中民,张雷明,等. 内蒙古森林碳汇特征研究进展〔J〕. 应用生态学报,2014,25(11):3 366 – 3 372.〔Yang Hao,Hu Zhongmin,Zhang Leiming,et al. Characteristics of carbon storage of Inner Mongolia forests: A review〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(11):3 366 – 3 372. 〕

〔30〕 萨楚拉. 内蒙古草原牧区雪灾监测与风险评价研究〔D〕. 北京:中国农业科学院,2015.〔Sa Chula. Pastal and Grassland Snow Hazard Monitoring and Risk Assessment Research in Inner Mongolia〔D〕. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2015. 〕

〔31〕 杨昕,汤国安,王春,等. 基于 DEM 的山区气温地形修正模型——以陕西省耀县为例〔J〕. 地理科学,2007,27(4):525 – 530.〔Yang Xin,Tang Guo'an,Wang Chun,et al. Terra in revised ground surface temperature model of mountain in area based on DEM: A case study in Yaoxian County of Shanxi Province〔J〕. Scientia Geographica Sinica,2007,27(4):525 – 530. 〕

〔32〕 张海军. 2000—2009 年东北地区积雪时空变化研究〔D〕. 长春:吉林大学,2010.〔Zhang Haijun. Study on Spatio-Temporal Variations of Snow from 2000 to 2009 in Northeast China〔D〕. Changchun: Jilin University,2010. 〕

〔33〕 唐初明,陈丰惠. 雨雪冰冻灾害对荔浦县森林资源的影响〔J〕. 广西林业科学,2008,37(4):200 – 203.〔Tang Chuming,Chen Fenghui. Impacts of frost damage on forest resource in Lipu County〔J〕. Guangxi Forestry Science,2008,37(4):200 – 203. 〕

〔34〕 朱鸿伟. 森林生态系统的抗冰冻灾害能力研究〔D〕. 长沙:中南林业科技大学,2011.〔Zhu Hongwei. Study on the Frost Resistance Ability of Forest Ecosystem〔D〕. Changsha: Central South University of Forestry and Technology,2011. 〕

〔35〕 内蒙古自治区林业厅. 内蒙古自治区森林保险规模、各级财政保费补贴和综合理赔率均居全国第一〔EB/OL〕. http://xcb.nmglyt.gov.cn/xwpt/201602/t20160202_116417.html,2016 – 02 – 02.〔Inner Mongolia Autonomous Region Forestry Department. Inner Mongolia Autonomous Region forest insurance scale, financial insurance subsidies at all levels and comprehensive claims rate rank first in the country〔EB/OL〕. http://xcb.nmglyt.gov.cn/ xwpt/ 201602/t20160202 116417.html,2016 – 02 – 02. 〕

Assessment and Division of Forest Snow Disaster Risk in Inner Mongolia

DING Yan-long[1], SUN Xiao-rui[1], GAO Yong[1], DANG Xiao-hong[1], JIAO Hong-yuan[1], WU Hao[2]

(1. *College of Desert Science and Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010020, *Inner Mongolia*, *China*;
2. *Damaoqi Meteorological Observatory*, *Baotou Meteorological Bureau*, *Baotou* 014500, *Inner Mongolia*, *China*)

Abstract: The meteorological and forestry data, basic geographic information and socio-economic data related to forest snow disasters were selected to comprehensively assess the regional difference of snowstorm risk in Inner Mongolia, including the disastrous factors and vulnerability, environmental sensitivity to snow disasters, and snow disaster prevention and mitigation capabilities based on the theory of natural disaster risk. The weighted comprehensive scoring method and analytic hierarchy process (AHP) were used to establish a comprehensive assessment index system of forest snow disaster risk and to construct a zoning model of forest snow disaster risk in Inner Mongolia. The results indicated that the proportions of the areas with high and sub-high risk of forest snow disasters were 77.18% and 0.05%, respectively, and the areas were mainly located in Hulun Buir City. The proportion of the areas with medium risk accounted for 6.01% of the total area of forest snow disaster risk, they were mainly distributed in Xilin Gol League, Hulun Buir City, Chifeng City and Xing'an League, and their proportions were 0.61%, 36.50%, 9.11% and 5.99%, respectively. The proportion of the areas with sub-low and low snow disaster risk was 16.76% of the whole risk area, and they were mainly distributed in Alxa League, Erdos City, Xing'an League and other places. The forest snow disaster risk in Inner Mongolia decreases gradually from the northeast to the southwest, and it is basically consistent with the spatial distribution of forest and snow cover.

Key words: forest snow disaster risk; risk theory of natural disaster; risk zonation; Inner Mongolia